

# 土地利用动态变化对地表径流的影响<sup>\*</sup>

## ——以上海浦东新区为例

权瑞松<sup>1</sup>, 刘敏<sup>1</sup>, 侯立军<sup>2</sup>, 陆敏<sup>1</sup>, 张丽佳<sup>1</sup>, 欧冬妮<sup>1</sup>, 许世远<sup>1</sup>, 俞立中<sup>1</sup>

(1. 华东师范大学地理学系, 地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200062;

2. 华东师范大学河口海岸国家重点实验室, 上海 200062)

**摘要:** 结合基于遥感数据获得的土地利用结果与 SCS 模型, 在 GIS 环境下模拟了上海浦东新区不同阶段的土地利用/覆被变化对地表径流的影响。结果表明: 土地利用结构与格局的变化使地表径流深度趋于增大; 同时, 在浦东新区城市化的不同时期, 由土地利用/覆被变化引起的地表平均径流深度变化也不相同。

**关键词:** 土地利用/覆被变化; SCS 模型; 浦东新区; 地表径流深度

**中图分类号:** F293.2; P333.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-811X(2009)01-0044-06

## 0 引言

土地利用/覆被变化是人类改造和利用自然界的显著标志, 是区域、全球变化的主要驱动因素之一, 对于自然环境系统中的水文过程、生态过程等有着显著且深刻的影响<sup>[1]</sup>。在城市化进程中, 随着社会经济的发展, 城市周围的大量其它土地利用类型都转变为城市用地。这种变化将显著影响区域的水循环过程, 使下垫面不透水面积增加, 从而导致城市降雨后, 截留、填洼、下渗、蒸发量减少, 产生的地面径流量增大<sup>[2]</sup>, 使得城市内涝的可能性大大增加。而由于城市往往是人口和财富的聚集地, 灾害可能造成的损失将大大增加, 城市洪涝灾害问题已成为影响城市安全的一大障碍。能否有效抵御和防治城市洪涝灾害已成为现代城市进行长远规划和实现可持续发展的一个重要主题<sup>[3]</sup>。土地利用/覆被变化作为洪涝灾害的主要孕灾环境之一, 严重影响洪涝灾害的致灾过程, 所以探究城市地区土地利用/覆被变化引起的水文响应, 对进一步研究其对城市洪涝灾害的影响变得极为重要, 对于城市地区的洪涝灾害风险评价及灾害防御等有着极重要的意义。目前, 国内在这方面的研究很少而且仅局限于小流域范围

内<sup>[4-8]</sup>, 并且很少将城市地区作为研究对象。本文选择快速城市化的典型区域——上海浦东新区为研究对象, 在前人已有的土地利用/覆被变化研究的基础上<sup>[9-11]</sup>, 应用美国农业部水土保持局研制的 SCS (Soil Conservation Service) 模型<sup>[12]</sup>对强降雨条件下土地利用/覆被变化引起的地表径流变化进行了模拟分析。

## 1 研究方案

### 1.1 数据来源

#### 1.1.1 土地利用数据

在 GIS 的支持下, 以上海市 1:5 万地形图为底图, 对上海市 1994、2000、2003、2006 年 ETM 遥感影像进行地理配准和几何精度校正, 误差控制在一个像元内, 并进行影像拼接。参照国家土地资源宏观遥感调查分类系统的分类体系, 同时考虑上海市土地利用现状的特点以及本研究的需要, 对分类系统做了适当调整, 将研究区的土地利用类型划分为: 工商业用地、新式住宅用地、自然村落用地、道路广场用地、耕地、水体、果园、林地、绿地和未利用地, 共 10 类。

#### 1.1.2 土壤数据

以上海市土壤普查办公室编写的《上海土

\* 收稿日期: 2008-06-20

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (40730526)

作者简介: 权瑞松 (1984-), 男, 山东菏泽人, 硕士研究生, 研究方向为城市环境演变与自然灾害. E-mail: quanrs@yeah.net

通讯作者: 刘敏 (1964-), 男, 内蒙古自治区土左旗人, 教授, 博士生导师, 主要从事城市环境灾害与模拟研究。

E-mail: mliu@geo.ecnu.edu.cn

壤》<sup>[13]</sup>中的土壤分类为基础,根据 SCS 模型的土壤分类标准(表 1),对土壤进行了重新分类,最终得到符合 SCS 模型的浦东新区土壤分类结果(图 1)。由于城市用地以水泥地面等人工硬质地面为主,其透水性很弱即最小下渗率很小,根据模型土壤分类标准,将其归为 D 类。

表 1 SCS 模型土壤类型

土壤分类	土壤水文性质	最小下渗率 /(mm/h)
A	厚层砂、厚层黄土、团粒化粉砂土、砂质壤土	7.26 ~ 11.43
B	薄层黄土、粉砂壤土、壤土	3.81 ~ 7.26
C	粘壤土、薄层砂壤土、有机质含量低的土壤、粘质含量高的土壤	1.27 ~ 3.81
D	吸水后显著膨胀的土壤、塑性大的粘土、某些盐渍土、砂粘土,人工硬质地面	0 ~ 1.27

注:引自 National Engineering Handbook Section 4 并做了一定修正。



图 1 浦东新区土壤分类图

### 1.1.3 降水数据

为研究强降雨条件下土地利用/覆被变化对地表径流深度的影响,在研究中将上海市龙华雨量观测站 1874 ~ 1990 年 24 h 最大降水量<sup>[14]</sup>(204.4 mm,为计算简便起见,本文使用 200 mm)作为整个研究区域的统一降水输入。

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 SCS 模型

SCS 模型是美国农业部水土保持局在 20 世纪 50 年代开发的经验水文模型。目前该模型在美国及其他一些国家得到了广泛应用<sup>[15-17]</sup>,在我国也有一些介绍与应用<sup>[4-8,18-20]</sup>。

SCS 模型的基本产流公式为:

$$Q = \begin{cases} (P - Ia)^2 / (P + S - Ia) & P \geq Ia \\ 0 & P < Ia \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $P$  为一次降雨的总量(mm);  $Q$  为径流深度

(mm);  $Ia$  为初损(mm);  $S$  为流域当时的最大可能滞留量(mm)。因为  $Ia$  是一个难以求准的物理量,美国水土保持局在计算  $Ia$  时引入下式:

$$Ia = 0.2 S. \quad (2)$$

理论上,  $S$  的变化范围很大,不利于取值,模型制作者引入了  $CN$  (Curve Number), 并规定:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254. \quad (3)$$

$CN$  是反应降雨前流域特征的一个综合参数,也是 SCS 模型的主要参数,它与流域前期土壤湿润程度(Antecedent moisture condition, 简称 AMC)、坡度、土壤类型、植被和土地利用现状等有关。在 SCS 模型中,根据前 5 d 总雨量将土壤湿润程度分为干(AMCI)、正常(AMCII)、湿(AMCIII)3 种级别。本研究假设前期土壤湿润程度为正常状态(AMCII)。

根据 SCS 模型含义,  $CN$  值为土地利用类型、土壤类型、前期土壤湿润程度等下垫面因素的函数。因土壤属性较稳定,将前文中确定的土壤分类结果作为不变值,用于模型计算中。根据 SCS 模型提供的  $CN$  值查算表<sup>[12]</sup>以及浦东新区的土壤分类结果、土地利用分类结果,参考国内外研究者在 SCS 模型应用中所确定的  $CN$  值矩阵<sup>[15-20]</sup>,确定了浦东新区正常状态(AMCII)下的  $CN$  值矩阵(表 2),并运用 GIS 软件 ArcView GIS 3.3 生成了正常状态(AMCII)条件下的  $CN$  值图层。

表 2 浦东新区 SCS 模型  $CN$  值(AMCII)

土地利用	CN 的土壤水文分类			
	A	B	C	D
工商业用地	89	92	94	95
新式住宅用地	77	85	90	92
自然村落用地	60	74	83	87
道路广场用地	98	98	98	98
耕地	67	76	83	86
水体	100	100	100	100
果园	40	62	76	82
林地	25	55	70	77
绿地	34	60	74	80
未利用地	72	82	88	90

### 1.2.2 GIS 环境下地表径流深度的估算

根据公式(3),运用 GIS 软件 ArcView GIS 3.3 的图层运算功能对  $CN$  值图层的每一像元(30 m × 30 m)进行计算,得出最大可能滞留量  $S$  图层,然后根据公式(1)、(2)计算浦东新区地表径流深度  $Q$ ,并生成每一年的地表径流深度图层。对相邻年份的图层进行减法运算即可得到浦东新区不同时期的地表径流深度变化图,具体操作流程见图 2。

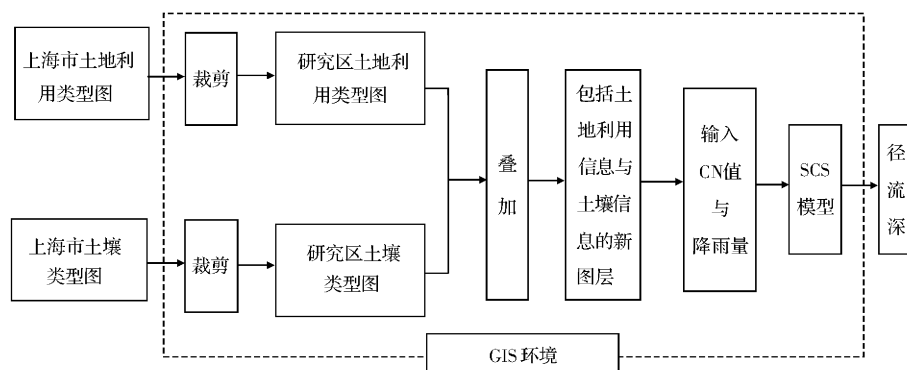


图2 径流深度计算流程图

### 1.2.3 土地利用/覆被变化信息的提取

运用 ArcView GIS 3.3 软件中 Tabulate 模块的空间叠加功能,进行矢量图形叠加,生成土地利用动态变化图,获得土地利用动态变化数据库,从而得

到研究区 3 个时段的土地利用转换矩阵,进而可以分析各种土地利用类型之间相互转化的情况。表 3、4、5 分别为 1994~2000 年、2000~2003 年和 2003~2006 年的浦东新区土地利用转换矩阵。

表 3 1994~2000 年浦东新区土地利用转换矩阵

hm<sup>2</sup>

土地类型	水体	耕地	林地	果园	工商业用地	自然村落	绿地	道路广场	新式住宅	1994 年合计
水体	921	147	7	0	171	38	10	13	19	1 326
耕地	3 539	19 702	143	12	6 168	5 223	691	1 597	1 244	38 319
果园	1	4	0	0	4	2	0	0	0	11
工商业用地	237	619	16	0	2 999	389	230	418	424	5 332
自然村落	322	1 397	10	0	1 330	1 082	114	364	1 142	5 761
绿地	7	0	86	0	7	0	2	3	10	115
道路广场	66	45	3	0	467	49	34	158	175	997
2000 年合计	5 093	21 914	265	12	11 146	6 783	1 081	2 553	3 014	

表 4 2000~2003 年浦东新区土地利用转换矩阵

hm<sup>2</sup>

土地类型	水体	耕地	林地	果园	工商业用地	自然村落	绿地	未利用地	道路广场	新式住宅	2000 年合计
水体	4 305	390	87	21	322	61	37	4	105	19	5 451
耕地	128	16 801	126	119	2 727	297	784	171	402	389	21 944
林地	10	13	190	28	21	1	1	0	2	0	266
果园	0	0	0	12	0	0	0	0	0	0	12
工商业用地	12	333	21	24	9 907	108	293	5	122	413	11 238
自然村落	11	231	21	0	666	5 474	91	12	98	181	6 785
绿地	0	4	0	1	32	4	1 004	0	10	24	1 079
道路广场	3	4	0	1	34	2	18	1	2 489	6	2 558
新式住宅	0	1	5	0	5	14	12	0	14	2 912	3 013
2003 年合计	4 469	17 777	450	206	13 764	5 961	2 340	193	3 242	3 944	

表 5 2003~2006 年浦东新区土地利用转换矩阵

hm<sup>2</sup>

土地类型	水体	耕地	林地	果园	工商业用地	自然村落	绿地	未利用地	道路广场	新式住宅	2003 年合计
水体	3 112	645	2	9	357	126	59	5	51	94	4 460
耕地	387	12 014	2	35	3 359	487	370	58	383	674	17 769
林地	12	145	40	0	76	16	117	0	12	30	448
果园	2	76	0	81	37	2	3	0	1	0	203
工商业用地	90	391	0	1	10 427	363	242	38	330	1 871	13 753
自然村落	109	635	2	1	978	3 728	45	8	128	328	5 962
绿地	20	71	0	1	543	6	1 378	66	92	133	2 340
未利用地	1	20	0	6	68	2	10	15	13	57	192
道路广场	51	79	3	1	216	36	77	2	2 653	124	3 242
新式住宅	13	6	0	0	238	20	5	24	96	3 542	3 944
2006 年合计	3 797	14 082	49	135	16 299	4 816	2 306	216	3 759	6 853	

## 2 结果及分析

在 GIS 环境下运行 SCS 模型, 生成各年份的地

表径流深度图层(图 3), 然后对相邻年份的图层进行相减, 得到了 1994 ~ 2000 年, 2000 ~ 2003 年和 2003 ~ 2006 年 3 个时期的地表径流深度变化图(图 4)。

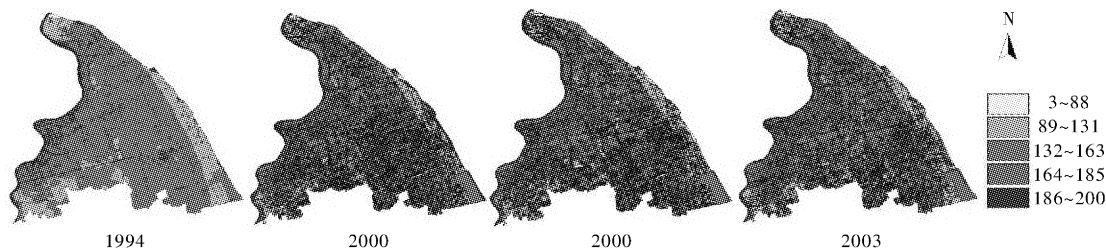


图 3 浦东新区不同时期径流深度图

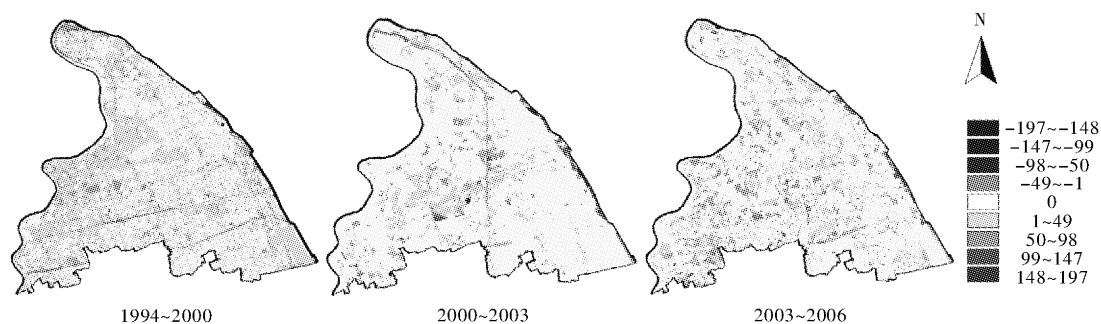


图 4 浦东新区不同阶段径流深度变化图

图 3 显示, 地表径流深度高值区(颜色较深区域)在空间分布上发生了很大变化。1994 年大部分地区径流深度相对较小, 径流深度高值区主要沿黄浦江岸分布且面积较小; 2000 年以后径流深度高值区面积不断向郊区扩张, 径流深度低值区面积越来越小。

通过分析浦东新区不同时期土地利用类型图发现, 导致这一现象的原因为: 1994 年产流能力较强的工商业用地主要沿黄浦江岸布局, 而且道路少而窄且大部分为产流能力较低的农村机耕路, 此时的浦东新区仍以产流能力较低的耕地为主; 2000 年后工业用地大部分搬迁到外高桥港区沿岸、内外环线之间及郊区偏远地区; 道路密而宽, 纵横交错形成格网且大部分为产流能力较强的不透水地面; 另外, 产流能力较强的商业用地则主要沿黄浦江岸和道路急剧增加, 形成一种典型的“沿江沿路扩展”的特点。

从图 4 可以看出, 浦东新区在快速的城市化过程中, 地表径流深度发生了很大的变化, 并且呈现出一定的时空差异, 以 1994 ~ 2000 年变化最为显著, 2003 ~ 2006 年变化次之, 2000 ~ 2003 年变化最小。

因为本研究中降雨在整个研究区域都以

200 mm 统一输入, 地表径流深度的变化仅受流域当时的最大可能滞留量  $S$  影响, 而最大可能滞留量  $S$  又是由土壤属性(不变)和土地利用类型决定, 所以土地利用/覆被变化是引起地表径流深度变化的原因。

模拟结果显示, 随着时间的推移, 地表径流深度趋于增大; 同时, 在浦东新区城市化的不同时期, 由土地利用/覆被变化引起的地表径流深度变化也不相同。在 24 h 降水 200 mm 的情境下, 1994、2000、2003 和 2006 年的平均径流深度分别为 150.33 mm、159.76 mm、159.86 mm 和 163.52 mm; 同时, 城市化导致的平均径流深度在 1994 ~ 2000 年间增加了 9.43 mm, 2000 ~ 2003 年间增加了 0.10 mm, 2003 ~ 2006 年增加了 3.66 mm。

通过分析土地利用转换矩阵(表 3、4、5)和地表径流深度变化图(图 4)发现, 产生这一结果的原因在于, 在浦东新区城市化的不同时期, 土地利用的类型与结构有如下不同。

(1) 1994 ~ 2000 年耕地面积减少了 16 405  $\text{hm}^2$ , 耕地面积占研究区域的比重由 73.9% 锐减至 41.9%, 其中大部分流向了产流能力更强的工商业用地(6 168  $\text{hm}^2$ )、水体(3 539  $\text{hm}^2$ )及道

路广场用地(1 597 hm<sup>2</sup>)。水体、工商业用地和道路广场用地所占比重分别增加了 14.2%、7.3%、3.0%，而其它类型的土地利用类型面积也有不同程度的增加。这一阶段浦东新区整体的最大可能滞留量 S 大幅下降，导致 1994 ~ 2000 年地表平均径流深度大幅增加。

(2) 2000 ~ 2003 年耕地面积减少了 4 167 hm<sup>2</sup>，其所占比重下降了 8.0%，耕地面积减少的速度放慢，其中大部分转向了产流能力更强的工商业用地(2 727 hm<sup>2</sup>)、道路广场用地(402 hm<sup>2</sup>)和新式住宅用地(389 hm<sup>2</sup>)。此时，工商业用地、新式住宅用地、道路广场用地所占比重分别增加了 4.8%、1.8% 和 1.3%。但同时水体面积也减少了 982 hm<sup>2</sup>，转变为产流能力较低的其它土地利用类型，并且产流能力较低的林地、果园、绿地面积有不同程度的增加。浦东新区整体的最大可能滞留量 S 下降幅度比 1994 ~ 2000 年小了许多，所以导致这一时段地表平均径流深度略微增加，增加的幅度比 1994 ~ 2000 年小了许多。

(3) 2003 ~ 2006 年，耕地与水体转变为工商业用地、道路广场等城市用地的比例有所下降，但产流能力较低的林地、果园和绿地转变为工商业用地、道路广场等城市用地的比例大大增加，所以地表平均径流深度变化幅度比 2000 ~ 2003 年大。

由此可见，城市化引起的水文响应与城市化过程中土地利用/覆被变化有着密切而复杂的关系。从研究结果看，虽然土地利用/覆被变化导致地表径流深度趋于增大，但在城市化的不同时期，土地利用/覆被变化导致的地表径流深度的变化特征也不相同。

### 3 结论与讨论

(1) 浦东新区土地利用/覆被变化使径流深度趋于增大，但在城市化的不同时期土地利用/覆被变化对地表径流的影响呈现不同的特征。在 1994 ~ 2000 年，由于工商业用地、道路广场等城市用地主要由耕地转化而来，地表径流深度大幅度增加；2000 ~ 2003 年，工商业用地、道路广场等城市用地主要由耕地和自然村落用地转化而来，此时虽然耕地面积继续下降但速度明显放慢，同时产流能力强的水体面积开始减少，而产流能力较低的林地、果园、绿地面积有不同程度的增加，使得这一时期地表径流深度虽然仍继续增加，但

增幅很小；2003 ~ 2006 年，耕地与水体转变为工商业用地、道路广场等城市用地的比例继续下降，而产流能力较低的林地、果园和绿地转化为工商业用地、道路广场等城市用地的比例大大增加，使得本阶段的地表径流深度增幅有所回升。

(2) 需要注意的是，城市化过程中各土地利用类型间的转换没有一定的规律，因此在研究不同地区土地利用/覆被变化对地表径流深度的影响时，应该针对具体地区、具体情况进行分析。

(3) 利用 GIS 软件 ArcView GIS 3.3 仅仅分析了土地利用/覆被变化对地表径流深度的影响，要进一步分析土地利用/覆被变化对沿海城市的洪涝灾害带来的影响，需要充分考虑地形、地下排水管道的排水能力、地面沉降等众多因素的影响。

### 参考文献：

- [1] 郑璟, 袁艺, 冯文利, 等. 土地利用变化对地表径流深度影响的模拟研究——以深圳地区为例[J]. 自然灾害学报, 2005, 14(6): 77-82.
- [2] 冉茂玉. 论城市化的水文效应[J]. 四川师范大学学报: 自然科学版, 2000, 23(4): 436-439.
- [3] 赵思健, 陈志远, 熊利亚. 利用空间分析建立简化的城市内涝模型[J]. 自然灾害学报, 2004, 13(6): 8-14.
- [4] 史培军, 袁艺, 陈晋. 深圳市土地利用变化对流域径流的影响[J]. 生态学报, 2001, 21(7): 1041-1049.
- [5] 王渺林, 夏军. 土地利用变化和气候波动对东江流域水循环的影响[J]. 人民珠江, 2004, (2): 4-6.
- [6] 刘贤赵, 康绍忠, 刘德林, 等. 基于地理信息的 SCS 模型及其在黄土高原小流域降雨-径流关系中的应用[J]. 农业工程学报, 2005, 21(5): 93-97.
- [7] 徐秋宁, 马孝义, 安梦雄, 等. SCS 模型在小型集水区降雨径流计算中的应用[J]. 西南农业大学学报, 2002, 24(2): 97-107.
- [8] 陈军峰, 张明. 梭磨河流域气候波动和土地覆被变化对径流影响的模拟研究[J]. 地理研究, 2003, 22(1): 73-78.
- [9] 孟飞, 刘敏, 侯立军, 等. 浦东新区土地利用的时空变化分析[J]. 华东师范大学学报: 自然科学版, 2006, (4): 56-63.
- [10] 孟飞, 刘敏. 高强度人类活动下河网水系时空变化驱动机制分析——以浦东新区为例[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2006, 42(4): 15-20.
- [11] 张心怡, 刘敏, 孟飞. 基于 RS 和 GIS 的上海城建用地扩展研究[J]. 长江流域资源与环境, 2006, 15(1): 19-33.
- [12] U. S Soil Conservation Service. National Engineering Handbook Section 4, Hydrology [M]. USA: U. S Government Printing Office, 1972.
- [13] 上海土壤普查办公室. 上海土壤[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1992: 97-163.
- [14] 上海气象志编纂委员会. 上海气象志[M]. 上海: 上海社会

- 科学院出版社, 1997.
- [15] Mary J M. Hydrologic Evaluation of Runoff; The Soil Conservation Service Curve Number Technique as an Interactive Computer Model [J]. Computer & Geosciences, 1995, 21 (8): 929-935.
- [16] Mishra S K, Tyagi J V, Singh V P, et al. SCS - CN - based modeling of sediment yield [J]. Journal of Hydrology, 2006, (324): 301-322.
- [17] French R H, Miller J J, Dettling C, et al. Use of remotely sensed data to estimate the flow of water to a playa lake [J]. Journal of Hydrology, 2006, (325): 67-81.
- [18] 袁艺, 史培军. 土地利用对流域降雨径流关系的影响——SCS 模型在深圳地区的应用[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2001, 37(1): 131-136.
- [19] 魏文秋, 谢淑琴. 遥感资料在 SCS 模型产流计算中的应用[J]. 环境遥感, 1992, 7(4): 243-250.
- [20] 许彦, 潘文斌. 基于 ArcView 的 SCS 模型在流域计算中的应用[J]. 水土保持研究, 2006, 13 (4): 176-182.

## Impact of Land Use Dynamic Change on Surface Runoff: A Case Study on Shanghai Pudong New District

Quan Ruisong<sup>1</sup>, Liu Min<sup>1</sup>, Hou Lijun<sup>2</sup>, Lu Min<sup>1</sup>, Zhang Lijia<sup>1</sup>,  
Ou Dongni<sup>1</sup>, Xu Shiyuan<sup>1</sup> and Yu Lizhong<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Geographic Information Science of the Ministry of Education, School of Resources and Environment Science, East China Normal University, Shanghai 200062, China; 2. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

**Abstract:** Through integrating remote sensing data and SCS model under the GIS environment, the impact of land use and land cover changes on the surface runoff in Shanghai Pudong New District is studied. The result shows that the land use structure and pattern change result in the increase of surface runoff depth. Moreover, the changes of average surface runoff depth induce by land use and land cover changes are different in the different stages of Pudong New District urbanization.

**Key words:** land use and cover change; SCS model; Pudong New District; surface runoff depth